

文章编号:1001-5078(2007)09-0832-03

新型硅激光器系统的优化设计

尉 然, 郭志友, 张建中, 刘松麟

(华南师范大学信息光电子学院光电子材料与技术研究所, 广东 广州 510631)

摘 要:通过在硅波导上添加反向偏压的PIN结构,建立了完整的全硅激光器系统。该系统包括半导体泵浦光源和硅波导放大器。建立的硅激光器增益模型,与已知的实验结果达到了很好的一致,并给出了泵浦光源输出波形和硅激光器的输出波形。该系统可以集成在很小的CMOS器件上,实现光电子器件的集成化,有着广泛的应用前景。

关键词:全硅激光器;泵浦光源;波长可调;PIN硅波导;双光子吸收

中图分类号:TN248.1 **文献标识码:**A

Optimized Design of the New Silicon Laser System

WEI Ran, GUO Zhi-you, ZHANG Jian-zhong, LIU Song-lin

(Optoelectronic Material and Technology Institute, School for Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: The system of all-silicon laser is designed, which is based on silicon wave guide of PIN structure. That system includes semiconductor pump photosource and the silicon waveguide amplifier. The model of input and output of the laser is set up, which is in great conformity with the results of the experiment. Combining with experiments and formula derivations, the waveforms of the pump beam and all-silicon laser beam are shown. The system can be integrated in CMOS device in order to achieve the integration of photoelectron equipment.

Key words: all-silicon laser; pumping; tunable wavelength; PIN silicon waveguide; two photons absorption

1 引言

半导体激光器与普通的气体、固体激光器相比,具有转换效率高、覆盖波段范围广、使用寿命长、具有直接调制能力、体积小、质量轻、价格便宜等优点,因此得到了广泛的应用和关注^[1]。特别是最近有报道指出,国外可以在单独硅芯片的全硅波导腔中完成拉曼激光试验^[2-3]。这代表着人类朝着把实用的连续波光放大器和激光器同其他光电元器件集成在一起的CMOS硅芯片方向前进了一大步。对于这种连续波拉曼硅激光器,需要高纯度、用电信号就能够使波长连续变化泵浦光源的激励。因此,本文设计了一套完整的连续波拉曼硅激光器系统,包括泵浦光源和硅波导放大器。

2 泵浦光源的结构

为了获得足够大且平坦的增益,往往需采用多个不同波长半导体泵浦激光器进行泵浦,这类拉曼

光纤放大器的关键技术之一是泵浦的优化配置^[3]。泵浦光源的结构是建立在分布布拉格反射型(DBR)激光器^[4]的基础上,把激光器分为各自具有独立电极的有源区域、无源波导相位控制区域和DBR区域,三个区域集成在连续的沟道行波导结构内,其结构如图1所示。

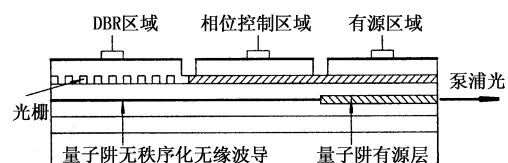


图1 三区域可变波长 DBR 激光器截面结构

Fig. 1 the structure of the section of the DBR laser

基金项目:广东省科技攻关项目(No. 2KM01102G)。

作者简介:尉 然(1982-),男,硕士生,从事光学工程专业的研究。E-mail:winrer@163.com

收稿日期:2007-02-02

相位控制区的作用是使谐振波长 λ_m 与布拉格波长 λ_B 一致,即满足相位条件:

$$\phi_1 = \phi_2 + 2m\pi \quad (1)$$

其中, ϕ_1 是 DBR 区的相位变化; ϕ_2 是相位控制区和有源区的相位变化。谐振波长 λ_m 与布拉格波长 λ_B 分别通过相位控制区和 DBR 区域的注入电流来调谐,输出功率通过改变有源区的注入电流来调节。如果仅改变 λ_B ,则只能得到不连续调谐并出现跳模;如果仅改变 λ_m ,则只能在 λ_B 附近极小范围内得到周期性连续调谐,可避免跳模;如果同时改变 λ_m 和 λ_B ,则可以在较大范围内得到无跳模的连续调谐或有跳模的连续调谐(准连续调谐)。

三区域型可变波长 DBR 激光器波长的调谐可用下式表示:

$$\Delta\lambda = 2\Lambda\Delta N_{\text{eact}} = 2\Lambda\Gamma \frac{dN_{\text{eact}}}{dN} (J_d/eBt)^{1/2} \quad (2)$$

其中, Γ 是模式限制因子; $\frac{dN_{\text{eact}}}{dN}$ 是单位载流子浓度引起的折射率变化; B 是辐射复合系数; J_d 是注入电流密度。由此可见,较大的 Γ ,即较厚的波导层对应着较大的调谐范围, $\Delta\lambda$ 随注入电流的增加而变大,但过大的电流注入产生的热效应会影响器件的正常工作,所以注入电流不能过大。此外,波长调谐范围还与波导层的组分有关,当该组分对应的波长 λ_g 越接近激光波长时,调谐范围越大。

因此,调节 DBR 区电流实现激光器输出波长的粗略调谐,调节相位控制区电流实现激光器输出波长的精细调谐,有源区电流主要是控制激光器的输出光功率,对调谐特性影响较小。这种泵浦光源具有波长调谐范围宽、调谐速度快、低成本、输出功率大、稳定性好、便于与其他器件集成等优点。

3 全硅激光器

利用受激拉曼散射(SRS)产生纯增益或光放大的主要限制是双光子吸收(TPA)。硅波导中 TPA 会产生大量光生自由载流子,这些自由载流子会带来额外的光学损失^[2-3],减弱了拉曼信号。

图 2 中的硅拉曼激光器是在包含有反向偏置的 PIN 二极管结构的低损耗单模排状波导管上制造的。排状波导管使用标准的光刻图形工艺和反应离子刻蚀技术在无掺杂的 SOI 衬底沿 [100] 晶向的表面上制造成的^[2]。波导谐振腔采用折线形结构,并采用反射镜。在波导角处,尽可能地做成圆滑的曲面,以减小损耗。硅波导和两端的解理面,组成了法

布里-帕罗(F-P)腔,波导两端的解理面是 F-P 腔的前后镜面,在波导两端的解理面上蒸镀增透膜,可以增加耦合进硅波导的泵浦功率^[5]。

这种硅波导可以有效地减弱双光子吸收效应。当反向偏置电压加在 PIN 结构上,由于外加电场的作用,TPA 产生的位于 P 区和 N 区的电子-空穴对被扫出波导,可以有效地降低光生自由载流子寿命,极大地减少 TPA 带来的非线性损失,甚至可忽略非线性损失^[6-7]。

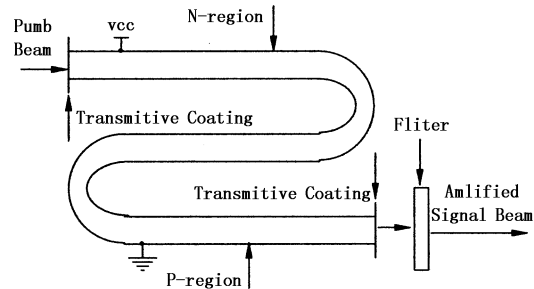


图 2 全硅拉曼激光器波导

Fig.2 silicon waveguide used in the Raman laser

当频率为 ω_s 的弱信号光和频率为 ω_p 的大功率泵浦光耦合输入硅波导时(信号光波长置于泵浦光的拉曼增益带宽内),泵浦光的能量通过受激拉曼散射(SRS)效应转移给信号光,使信号光得到放大。信号光与泵浦光的相互作用过程可由下面的耦合方程组来进行描述:

$$\frac{dP_s}{dz} = \frac{g_R}{A_{\text{eff}}} P_p P_s - \alpha_1 P_s \quad (3)$$

$$\frac{dP_p}{dz} = -\frac{\omega_p}{\omega_s} \frac{g_R}{A_{\text{eff}}} P_p P_s - \alpha_2 P_p - \beta P_p^2 - \sigma N_{\text{TPA}}(z) P_p \quad (4)$$

其中, P_p 和 P_s 分别是泵浦光和信号光功率; α_1, α_2 分别是硅波导对泵浦光和信号光的线性衰减系数; ω_p 和 ω_s 分别是泵浦光和信号光角频率; z 为光沿硅波导的传播方向; A_{eff} 是波导有效面积; g_R 是拉曼增益系数; β 为 TPA 系数; σ 是 TPA 产生的自由载流子横截面; N_{TPA} 是 TPA 产生的自由载流子浓度; σN_{TPA} 为 TPA 引起的自由载流子吸收系数。公式(3)第 1 项是泵浦光对信号光的放大作用,第 2 项是信号光在硅波导中的线性损失;公式(4)第 1 项是泵浦光放大信号光引起的消耗,第 2 项是泵浦光在硅波导中传输引起的线性损耗,第 3 项和第 4 项分别为 TPA 和光生自由载流子引起的非线性损耗。

在图 2 的波导 P 极和 N 极上加反偏电压时, TPA 产生的光生载流子被扫出波导,当加在硅波导

上的反偏电压在不低于 25V 时^[2], 光生自由载流子寿命可以下降到约 1ns, 在这种情况下可以忽略非线性损失^[5], 即忽略式(4)的第3项和第4项。 $P_s(0)$ 是信号光在硅波导输入端的功率, 没有泵浦时:

$$P_{s0}(z) = P_s(0) \exp(-\alpha_1 z) \quad (5)$$

当 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ 时, 由式(3)、(4)、(5)求得硅波导的单程放大系数 G_A 为:

$$G_A = \frac{P_s(z)}{P_{s0}(z)} = \frac{\exp\left[\frac{g_R P_P(0)}{\alpha A_{\text{eff}}}(1 - \exp(-\alpha z))\right]}{1 + \frac{\omega_p P_s(0)}{\omega_s P_P(0)} \cdot \exp\left[\frac{g_R P_P(0)}{\alpha A_{\text{eff}}}(1 - \exp(-\alpha_1 z))\right]} \quad (6)$$

泵浦光从一侧耦合进谐振腔, 在受激拉曼散射效应的作用下产生拉曼激光, 泵浦光和拉曼激光从另一表面出射, 再通过滤波器, 即可得到拉曼激光。这种结构的好处是激光谱线宽, 器件体积小, 集成度高, 结构简单, 与 CMOS 工艺相容, 因而可以和其他光电部件一起集成, 达到很高的集成度。

4 实验结果和计算

图3是 1.5 μm 的 InGaAsP 波长可调激光器的调谐特性图。图3左图是改变有源区注入电流 I_a 的波长调谐特性, 右图是改变 DBR 区和相位控制区电流 I_l 的波长调谐特性。可得到光连续输出波形, 波长从 1555nm 到 1559nm 连续输出。

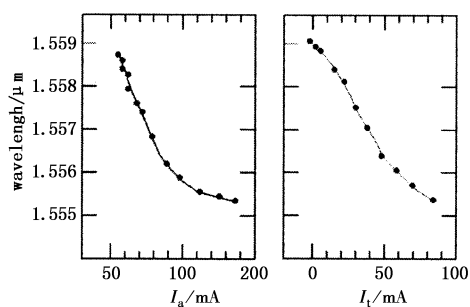


图3 泵浦光输出波长变化曲线

Fig.3 the output wavelength of pump beam

在反向偏压 25V 时, 前后反射镜反射率 $R_1 = R_2 = 1\%$, 拉曼增益系数 $g_R = 7.5\text{cm}/\text{GW}$, $\alpha = 0.35\text{dB}/\text{cm}$, 泵浦光波长 $\lambda_P = 1536\text{nm}$, 泵浦功率 $P_P = 0.6\text{W}$, 波导有效面积 $A_{\text{eff}} = 1.6\mu\text{m}^2$, 信号光波长 $\lambda_S = 1669.5\text{nm}$, 信号光功率 $P_S = 10\text{mW}$, 波导长 $L = 4.8\text{cm}$, 改变输入泵浦光功率, 由公式(6)计算得到输出光功率与泵浦光功率之间的关系如图4所示。这与文献[8]中的试验数据达到了很好的一致。

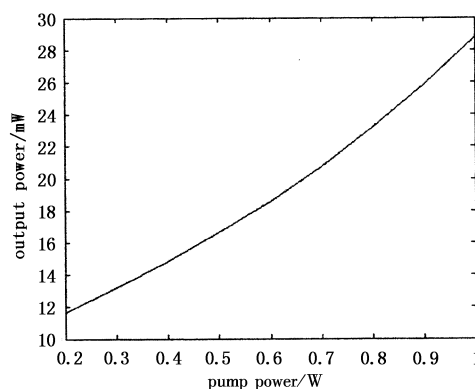


图4 输出信号光功率与泵浦光功率的关系

Fig.4 output power response to increasing pump power

5 结论

从以上分析设计可以看出, 全硅激光器可以实现高纯度的输出光, 并可以通过调节泵浦光的波长来调节输出波长, 具有很好的连续可调性, 是十分理想的集成激光器。建立的全硅激光器数学模型, 其模型的输出特性和已知的实验结果达到了很高的一致性。该全硅激光器系统能在传输指令开启或关闭芯片以及计算机的使用中扮演重要角色, 是高带宽的硅光学器件进入主流市场的重要技术, 具有很广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 王莉, 张以谟, 吴荣汉, 等. 半导体激光器的进展[J]. 激光与红外, 1999, 29(5): 267-270.
- [2] Haisheng Rong, Richard Jones, Ansheng Liu, et al. A continuous-wave Raman silicon laser [J]. NATURE, 2005, 433(17): 725-727.
- [3] Haisheng Rong, Ansheng Liu, Richard Jones, et al. An all-silicon Raman laser [J]. NATURE, 2005, 433(20): 292-294.
- [4] 姬小利, 江若璘, 李亮, 等. AlGaIn/GaN 分布布拉格反射镜的设计与表征[J]. 激光与红外, 2005, 35(11): 888-890.
- [5] 杨晓妍, 杨璘, 朱明方, 等. GaAlAs/GaAs 半导体功率放大激光器的研究[J]. 激光与红外, 2003, 33(6): 428-429.
- [6] D Dimitropoulos, R Jhaveri, R Claps, et al. Lifetime of photogenerated carriers in silicon-on-insulator rib waveguides [J]. Appl. Phys. Lett., 2005, 86: 071115(1-3).
- [7] Haisheng Rong, Ansheng Liu, Remus Nicolaescu, et al. Raman gain and nonlinear optical absorption measurements in a low-loss silicon waveguide [J]. Appl. Phys. Lett., 2004, 85(12): 2196-2198.
- [8] Ozdal Boyraz, Bahram Jalali. Demonstration of a silicon Raman laser [J]. Optics Express, 2004, 12(21): 5269-5273.